

AUTOMIOESTIMULADOR: BIOFEEDBACK APLICADO A LA REHABILITACIÓN

A. P. Laquidara^{1,2}, L. M. Zerbino^{1,2,3}, Carolina Lagraña¹, Ezequiel Yedinak¹

- 1- Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Calle 1 y 47. (1900) La Plata - Buenos Aires - Argentina
 - 2- Centro de Investigaciones Ópticas (CIOP) (CONICET-CICBA) C.C. 3 (1897) Gonnet
 - 3- Facultad Regional La Plata. Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Calle 60 y 126. (1900) La Plata
- e-mail: polok@ciop.unlp.edu.ar

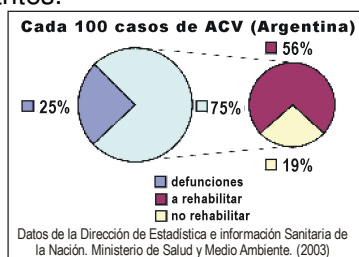
En el Marco de los Proyectos 11/I130 y 11/I170 se concibieron, diseñaron y desarrollaron con financiamiento de subsidios de la CIC-BA el prototipo y cuatro unidades de aparatos que hemos denominado AutoMioEstimulador. Son equipos electrónicos destinados a la rehabilitación de miembros superiores e inferiores paralizados de pacientes con secuelas de accidentes cerebro-vasculares (ACV) o lesiones similares, por medio de la electroestimulación. El equipo es compacto, portátil y alimentado a baterías recargables, pudiéndose utilizar en servicios de fisioterapia o en domicilio del paciente. La técnica que emplea el aparato es la del autoentrenamiento cognitivo o biofeedback, aplicando electroestimulación sobre los miembros paralizados, controlada por la contracción voluntaria de un miembro sano. El paciente decide voluntariamente el instante de inicio y finalización de la electroestimulación, controlando así los intervalos de estimulación y relajación del músculo parético. Para realizar la función mencionada cuenta con dos juegos de electrodos: un par de electrodos de estimulación y otro par para electromiografía (EMG) y su respectiva toma de tierra, es decir, en total cinco electrodos. El uso del aparato persigue el logro de mayor fuerza muscular, disminución de la espasticidad, mantenimiento del trofismo muscular y mejoramiento de la circulación.

El AutoMioEstimulador consta de un gabinete metálico dentro del que se alojan los circuitos electrónicos que sensan la actividad muscular voluntaria (EMG) y generan la corriente que provoca la contracción del músculo paralizado (electroestimulador). Sobre la cara superior del equipo se encuentra un instrumento que indica el valor de la corriente pico de cada impulso aplicado al grupo muscular a tratar, y ese valor puede ser ajustado. La señal eléctrica detectada es procesada por un microprocesador mediante algoritmos de filtrado digital y cálculo que permiten discriminar claramente los estados de contracción y relajación de un músculo sano. Mediante dos pulsadores en el frente del equipo se registra el nivel de relajación o de referencia del músculo sano y se habilita o bloquea la electroestimulación del músculo parético. También existen sobre el frente del equipo dos LEDs que indican el estado de carga de las baterías cuando éstas se cargan con el adaptador a la tensión de línea. Los circuitos electrónicos diferenciados por sus funciones son: electromiógrafo, microprocesador, fuente conmutada de tensión aplicable al paciente y cargador de baterías. Varios equipos fueron construidos con apoyo de la CICBA y están siendo utilizados en comodato para su evaluación en unidades hospitalarias de la Provincia de Buenos Aires que cuentan con servicio de rehabilitación física.

Objetivo: Rehabilitación del ACV

Los ataques cerebro vasculares (ACV) son la primer causa de incapacidad a largo plazo en la mayor parte del mundo industrializado. El riesgo de estos ataques aumenta con el incremento de la edad, doblándose con cada década posterior a los 55 años de edad.

La mayoría de los perjuicios de las personas atacadas reporta mayor problema en la función de las extremidades superiores, lo cual es un factor que condiciona su calidad de vida cotidiana, y que ocasiona que requieran ayudas espaciales y asistencia de rehabilitación. El grado de recuperación motora luego del ACV esta directamente relacionado al grado de severidad inicial de la afección y, al intervalo de tiempo desde el ataque y el movimiento voluntario. La recuperación de la función de las extremidades es muy rápida durante los primeros meses luego del ACV. De todos modos, dentro de los primeros tres meses después del ataque, solo el 25% de las personas afectadas recupera la función normal de las extremidades. Hay una creciente evidencia de que la estimulación eléctrica tiene un positivo efecto en la restauración motora de las extremidades superiores luego del ACV. Actualmente, la mayor parte de la rehabilitación es realizada por medio de ejercicios y controles físicos, pero los aspectos cognitivos de la rehabilitación del ACV son muy importantes.



La técnica de estimulación eléctrica funcional comenzó a desarrollarse en 1961 (Liberson, et al) y actualmente se utiliza como terapia de rehabilitación, con el objetivo de lograr funcionalidad en miembros inferiores y en miembros superiores:

- *mayor fuerza muscular,*
- *disminuir la espasticidad,*
- *mantener el trefismo muscular,*
- *mejorar la circulación periférica.*

Los equipos que se utilizan en nuestro país son electroestimuladores que actúan cíclicamente con un período de contracción muscular producido por una corriente eléctrica y un período de relajación muscular por interrupción del pasaje del estímulo. El paciente es un participante pasivo, siendo el equipo quien establece los ciclos de contracción y relajación.

En el equipo que estamos analizando, los pacientes deben producir una contracción muscular voluntaria, captada a través de un sensor y que, a su vez, una vez alcanzado un determinado nivel, acciona al electroestimulador. La corriente eléctrica estimulante iniciada a partir de una contracción muscular se detiene al producirse la relajación muscular. En ella actúa la volición produciendo un mayor input cognitivo (Chae J, Bethoux F).

Bloques Funcionales

Este equipo es una combinación de Electromiógrafo (EMG) y Estimulador Eléctrico Neuromuscular (NMEST).

En forma separada; el Electromiógrafo detecta la actividad muscular voluntaria y el electroestimulador provoca la contracción muscular involuntaria. El trabajo unido de ambos es el que da lugar a la técnica descrita con anterioridad, también conocida como Estimulación Eléctrica Neuromuscular controlada por EMG.

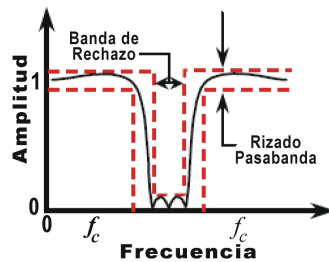
El equipo (o los equipos) deben estar perfectamente coordinados para separar la estimulación de la detección mioeléctrica, debido a que las señales mioeléctricas son del orden de los mV mientras que las aplicadas en estimulación ascienden a decenas de Volts.

Un conjunto de electrodos superficiales es sujetado al dorso del antebrazo para detectar la débil señal generada por la muñeca y los músculos extensores.

La mio-síñal es detectada por medio de un amplificador de instrumentación de bajo ruido. Posteriormente un microcontrolador digitaliza, filtra, procesa y compara en amplitud la señal con un umbral ajustable en forma manual o automática.

La implementación del filtro digital IIR es del tipo Notch, que permite la eliminación del ruido en 50 Hz emitido por la red de alimentación. El análisis espectral de la señal por medio del algoritmo de la FFT permite solo tener en cuenta las

componentes frecuenciales significativas de la actividad muscular, de modo de evitar interferencias de otras señales ajenas al proceso.



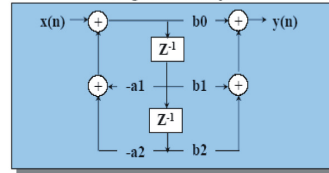
Función de transferencia

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}}$$

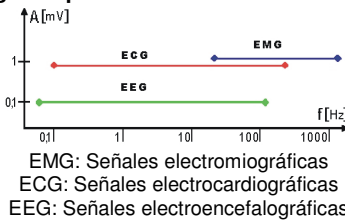
Ecuación en diferencias

$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a(k) \cdot y(n-k) + \sum_{k=0}^M b(k) \cdot x(n-k)$$

Diagrama de flujo

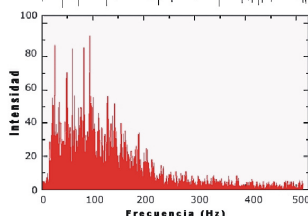


Rangos espectrales de señales biológicas



- Cuando el nivel de la mio-síñal excede el umbral base ajustado, la estimulación eléctrica es entregada al músculo, por medio del mismo conjunto de electrodos, produciendo una contracción más intensa y sostenida del mismo. Para este caso es necesario solo la utilización de 3 electrodos.
- En el caso que el músculo a tratar sea incapaz de producir el nivel suficiente de señal que genere el disparo, se prevee el modo de funcionamiento con un conjunto adicional de electrodos que permitirán ser colocados en el grupo muscular adecuado para el entrenamiento y que aporten la señal habilitante para la estimulación voluntaria. En este caso se utilizan 5 electrodos.

Mioseñal eléctrica

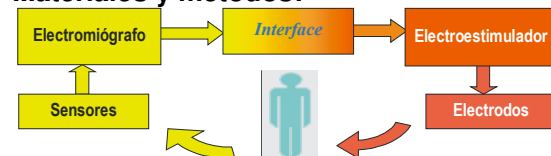


Histograma de la mioseñal

Validación

En el marco de una colaboración conjunta se han realizado los ensayos preliminares del prototipo conceptual, con el objeto de establecer parámetros de aplicación en pacientes neurológicos.

Materiales y métodos:



Este equipo es una combinación de Electromiógrafo (EMG) y Estimulador Eléctrico Neuromuscular (NMES). En forma separada; el EMG detecta la actividad muscular voluntaria y el NMES provoca la contracción del músculo paralizado. El trabajo unido de ambos es el que da lugar a la técnica conocida como Estimulación Eléctrica Neuromuscular controlada por EMG. A partir de la interacción con el equipo médico interviniente el prototipo-base se adaptó para que cumpla prestaciones específicas a fin de posibilitar su utilización en una estrategia terapéutica original que, basándose en el biofeedback permita al paciente, a través de la actividad de un músculo sano, regular tanto el inicio como el fin de la estimulación. Así, en este equipo, la actividad muscular voluntaria determina tanto el inicio de la electromioestimulación como su finalización. Estando el prototipo conceptual en operación, y habiendo superado las etapas de verificación y de control de calidad en el laboratorio se han implementado diferentes ensayos preliminares de manera conjunta entre el equipo técnico y el médico para poner a prueba el prototipo, verificando su funcionamiento en cuanto a seguridad del usuario, exactitud de las medidas, y evitar posibles efectos nocivos.

Especificaciones Técnicas del prototipo construido		
Cualitativas	Parámetros Configurables	Cuantitativas
<p>Modo de Operación: EMG-Estim</p> <p>Estimulación disparada por esfuerzo muscular</p> <p>Visualización por leds del nivel de señal muscular.</p> <p>Umbral fijo ajustable automáticamente</p> <p>Visualización de carga de batería y amplificación</p>	<p>Nivel de umbral de disparo.</p> <p>Corriente de salida por pulso (nivel de estimulación).</p> <p>Tiempo de estimulación controlado por el usuario</p> <p>Tiempo de pausa controlado por el usuario.</p> <p>Alerta de falsos contactos.</p>	<p>Corriente Aplicable: 0 - 100 mA</p> <p>Forma de Ondas: Pulsos rectangulares: ancho: 0,3 ms, período: 40 ms</p> <p>Tensión máxima: 150 V</p> <p>Funcionamiento con 4 baterías AA recargables con 220 V</p> <p>Sensado: 2 electrodos + tierra</p> <p>Estimulación: 2 electrodos</p> <p>Dimensiones: 20 cm x 11 cm x 8 cm</p>



Además del equipo bajo prueba se utilizó, en el primer test, a modo de ensayo de los electrodos de estimulación, un equipo estándar de electroestimulación NMES con parámetros eléctricos temporalmente iguales al ensayado.

El Auto-mio-estimulador ensayado consta de una consola alimentada a baterías con un juego de tres electrodos de sensado (ES), dos electrodos de estimulación (EE) y controles e instrumentos que permiten ajustar manualmente el umbral de turn-on del feedback y la corriente aplicable.

Plan de Trabajo de Ensayos de Campo

Fase I: Análisis y comprensión del funcionamiento del equipo a través del manual de instrucciones, y práctica por nuestro personal. Establecer protocolo de uso del equipo a través de diferentes mediciones, para definir parámetros a utilizar. Conclusiones.

Fase II: Selección de pacientes. Protocolo de tratamiento. Normatización del mismo

Fase III Tratamiento sistematizado de rehabilitación. Conclusiones.

Resultados de la Fase I

Población:

Se analizaron 9 voluntarios cuyas edades fueron de 26 a 42 años; no presentaban patologías motoras previas, todos presentaban estudios terciarios y estaban relacionados con la rehabilitación.

Como criterios de exclusión se establecieron las normas que se utilizan en el tratamiento de Estimulación Eléctrica Funcional:

1. Arritmias ventriculares y otras patologías cardíacas.
2. Antecedentes de enfermedades de lesión de neurona motora inferior.
3. Embarazo.
4. Osteoporosis.
5. Antecedentes de convulsiones.
6. Marcapasos cardíacos.
7. Lesiones en piel en sitio de colocación de electrodos.
8. Hipertensión arterial no controlada.

Ensayos Diseñados para la Evaluación y resultados: Se realizaron 3 ensayos por cada test en días diferentes. Duración de los ensayos: 30 minutos, porque es el tiempo de duración de la terapia de rehabilitación.

TEST 1: (Equipo estándar NMES)

Aplicación de electrodos de estimulación: en músculos extensores de los dedos-extensión de antebrazo sobre el brazo.

Evaluación de la contracción, que debe ser isotónica, con grado 4.

Se cronometra el tiempo de estimulación muscular. Máximo 30 minutos.

Finalizada por fatiga muscular-intolerancia sensitiva

TEST 2 (Auto-mio-estimulador)

Se explican pruebas a desarrollar: extensión de muñecas, contracción-relajación-extensión de tríceps braquial, contracción-relajación.

Punto de aplicación de electrodos de sensado (ES): extensor de dedos y tríceps del lado contrario a los electrodos de estimulación (EE).

Evaluación de respuesta a través de retroalimentación visual por el display.

Se cronometra el tiempo de la respuesta aferente, en movimientos cíclicos y

constantes sin interrupción. Se da por finalizada por defectos de relajación.

TEST 3 (Auto-mio-estimulador)

Se evalúa comprensión de consignas:

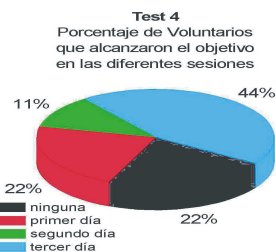
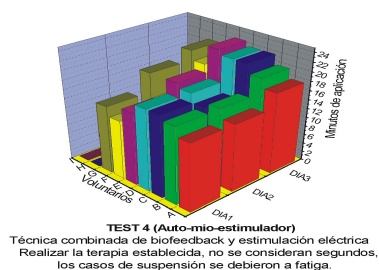
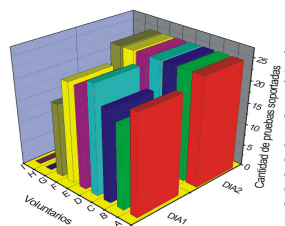
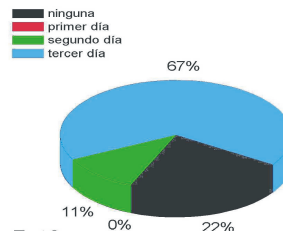
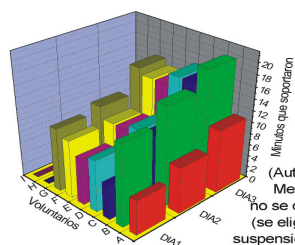
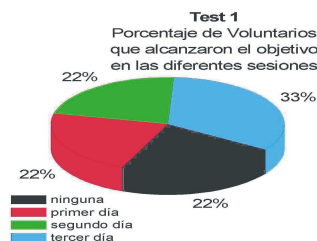
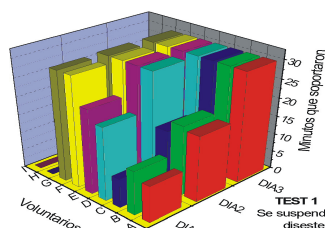
Actividad de contracción muscular voluntaria, turn-on del feedback-contracción por estímulo eléctrico. (Valor de la contracción muscular voluntaria eficaz que logra que el sensor ES lo capte y dispare el EE).

Se indican 25 intentos. Se computa número de fallas.

TEST 4 (Auto-mio-estimulador)

Actividad de contracción muscular voluntaria, turn-on del feedback-contracción por estímulo eléctrico

Se cronometra el máximo período de realización de contracciones.



Interpretación de resultados

La población en estudio, presentaban la sensibilidad conservada, al tercer día en tiempo lograron resistencia al estímulo eléctrico. Dos voluntarios no lograron tolerar la intensidad de estímulo en contracción efectiva por lo que fueron excluidos del estudio. En este punto, en donde se consideró el turn-on del sensor a través de la contracción muscular voluntaria fue el ítem de mayor desproporcionalidad, dado que no se logró la respuesta óptima en las sesiones preestablecidas, si bien presentaron una escala ascendente en la medida del avance de las sesiones. Teniendo en cuenta que la población en estudio tiene un alto grado de instrucción educativa, notamos dificultades en la comprensión de las consignas, habiendo logrado el total de las mismas en la segunda sesión. La realización del movimiento complejo voluntario y el accionamiento del estimulador mejoró en el transcurso de los días a través de un aprendizaje previo.

Conclusiones:

El equipo prototipo obtenido es autónomo, compacto y portátil, y a nuestro juicio reúne las condiciones para solicitar su homologación para su utilización en terapias de rehabilitación. Los resultados obtenidos son satisfactorios y permiten prever la posibilidad de su aplicación en terapias con estimulación eléctrica y diseñar las estrategias correspondientes. A los fines de la continuación del protocolo de estudios es posible concluir que es necesario: a) Evaluar aquellos pacientes que sean aptos para ingresar al tratamiento con estimulación eléctrica con criterios de inclusión y exclusión, establecidos para la Estimulación Eléctrica Funcional. b) La Población de pacientes deben cumplir con los siguientes requisitos para ingresar al plan de estudios: Lúcido, responder a órdenes simples y complejas, comprender claramente a las consignas, no presentar fenómenos de co-contracción y lograr una relajación adecuada para no interferir en el funcionamiento del receptor-sensor; buena tolerancia al estímulo eléctrico, y a la fatigabilidad. c) Podemos prever que el comienzo de la terapia con automioestimulador deberá adaptarse a cada paciente, una vez logrados los aprendizajes y entrenamiento

previos.

El prototipo construido, pasada la primera evaluación por un equipo especializado, se presentó en el SAMFYR 2006 y fue seleccionado para la Exposición INNOVAR 2006, recibiendo especial atención y elogio de profesionales y autoridades en la materia, por su innovación en terapias de rehabilitación. Se consideró necesario, iniciar las tramitaciones para su reconocimiento por los organismos correspondientes y encarar la construcción de al menos 4 equipos para su transferencia a los hospitales de la zona y completar los protocolos para su homologación por autoridades competentes.

Agradecimientos: Los autores agradecen el subsidio de la CIC-BA que hizo posible el desarrollo de este trabajo. (Subsidio CIC tipo B). Contraparte: Ministerio de Salud. Hospital Gutierrez. La Plata.



Referencias Bibliográficas:

- G Francisco, J Chae H Chawla, S Kirshblum, R Zorowitz, G Lewis and S Pang. Electromyogram triggered neuromuscular stimulation for improving the arm function of acute stroke survivors: a randomised pilot study. Arch Phys Med Rehabil Vol.79, May 1998.
- Joke R. de Kroon, Maarten J. Ijzerman, John Chae Gustaaf J. Lankhorst and Gerrit Zilvold. Relation Between Stimulation Characteristic and Clinical Outcome In Studies Using Electrical Stimulation to Improve Motor control of the Upper Extremity In Stroke.
- Hummel F, Celnik P, Giraux P, et al. Effects of non-invasive cortical stimulation on skilled motor function in chronic stroke. Brain 2005;128:490-499.
- B. H. Dobkin. Rehabilitation after Stroke. The new england journal of medicine. Volume 352:1677-1684. April 21, 2005. Number 16
- J. Heckmann, T. Mokrusch, A. Kröckel, S. Warnke, T. Vonstockert, and B. Neundörfer. EMG-Triggered Electrical Muscle Stimulation in the Treatment of Central Hemiparesis after a Stroke.